

MODELAGEM TERMO-HÍDRICA DO COMPORTAMENTO DO CONCRETO SOB TEMPERATURAS ELEVADAS

**Thaís Rossi Lopes Soares^a, Michèle Cristina Resende Farage^{a,b}, Flávia de Souza Bastos^{a,b}
e Norbert Renault^c**

^a*Programa de Pós Graduação em Modelagem Computacional, Universidade Federal de Juiz de Fora,
Rua José Lourenço Kelmer, S/n - Martelos, Juiz de Fora - MG, Brasil,
ppg.modelagemcomputacional@ufjf.edu.br, <http://www.ufjf.br/pgmc>*

^b*Departamento de Mecânica Aplicada e Computacional, Universidade Federal de Juiz de Fora, Rua
José Lourenço Kelmer, S/n - Martelos, Juiz de Fora - MG, Brasil, depto.mac@ufjf.edu.br,
<http://www.ufjf.br/mac>*

^c*L2MGC - Laboratoire de Mécanique et Matériaux du Génie Civil, Université de Cergy-Pontoise, 5
Mail Gay-Lussac, Neuville-sur-Oise, 95031 Cergy-Pontoise cedex, norbert.renault@u-cergy.fr,
<https://www.u-cergy.fr/fr/laboratoires/labo-l2mgc.html>*

Palavras Chave: Concreto, altas temperaturas, Cast3M, comportamento termo-hídrico.

Resumo. O concreto é um material heterogêneo e poroso cujo comportamento é extremamente complexo, e cujas características não são totalmente compreendidas. Quando sujeito a condições ambientais extremas, como é o caso da exposição a temperaturas elevadas, esse material está suscetível a alterações físicas e químicas que podem influenciar em seu desempenho estrutural. A previsão do comportamento deste material é complicada, pois o concreto, quando submetido a carregamentos térmicos, sofre alterações na sua estrutura porosa e nas propriedades do meio que podem influenciar seu desempenho macroestrutural térmico e mecânico. Este trabalho estuda o comportamento termo-hídrico de estruturas de concreto submetidas a carregamentos térmicos através de um modelo matemático desenvolvido a partir do estudo acoplado das transferências de calor e massa no interior do material quando exposto a altas temperaturas. Tal modelo é discretizado utilizando o método das diferenças finitas e o método dos elementos finitos, e em seguida implementado no programa livre de cálculo por elementos finitos, o Cast3M – programa desenvolvido pelo DMT-CEA (Département de Mécanique et Technologie du Commissariat à l'Énergie Atomique). São obtidos resultados de temperatura e saturação de maneira direta, e a partir deles é possível calcular a pressão de vapor, pressão líquida e pressão capilar, além da perda de massa. Esta pesquisa está inserida em um programa de colaboração entre a Universidade Federal de Juiz de Fora e a Universidade de Cergy-Pontoise (UCP), na França.

1 INTRODUÇÃO

O concreto é um material de uso comum na indústria da construção civil em todo o mundo. Essa preferência se dá por ele possuir características como: ótima resistência à água e por possuir constituintes fáceis de serem encontrados a baixo custo, o que o torna relativamente barato. Pode-se acrescentar também que o seu uso é difundido por não exigir especialização da mão de obra e ser de fácil execução.

No entanto, o comportamento desse material é complexo e suas propriedades ainda não são totalmente compreendidas. As dificuldades encontradas na descrição e previsão do comportamento de estruturas de concreto são associadas a heterogeneidade do meio, o qual é poroso e multifásico. Essas dificuldades são agravadas quando ocorre exposição à ambientes agressivos, os quais possuem: alta umidade, presença de substâncias corrosivas, poluição ou temperaturas elevadas. Essa exposição acarretam fenômenos físicos e químicos que alteram a estrutura porosa e as propriedades do meio.

A exposição do concreto a temperaturas elevadas pode ter efeitos prejudiciais, pois a reação de hidratação do cimento é reversível e termoativada. Dentre os efeitos nocivos podem ocorrer a desidratação da matriz sólida, a fissuração causada pelas pressões internas e o lascamento superficial (*spalling*).

No presente trabalho, é realizado um estudo sobre um modelo que permite a análise do comportamento termo-hídrico de estruturas feitas de concreto quando submetidas a altas temperaturas: como se dá a distribuição do calor na mesma e quais modificações e deteriorações o aquecimento acarreta.

O modelo aqui utilizado foi desenvolvido no CEA (Commissariat à l'Énergie Atomique, França) por [Sercombe et al. \(2001\)](#) e concluído no L2MGC por [de Moraes et al. \(2006a\)](#). Os cálculos térmicos e hídricos, foram discretizados e implementados no código para análise estrutural Cast3m (DMT/CEA – Département de Mécanique et Technologie du Commissariat à l'Énergie Atomique).

Esse modelo foi empregado com sucesso em diversos trabalhos. Em [de Moraes et al. \(2006b\)](#) o modelo numérico foi validado através de resultados experimentais de um concreto proposto por [Kanema et al. \(2005\)](#). Já em [de Moraes et al. \(2007\)](#), foram propostos dois modelos mecânicos inspirados no termo-hídrico. [Ferreira \(2011\)](#) realizou o estudo termo-hídrico de estruturas compostas por bicamadas rocha-concreto. Foi desenvolvido um programa experimental e a partir dos dados obtidos, foi implementado o modelo numérico adaptado para o problema. Em [Nguyen \(2013\)](#) o estudo foi realizado em espécimes de grandes dimensões, e mais uma vez foram feitos estudos experimentais e numéricos.

Os resultados obtidos com as aplicações desse modelo, representam adequadamente o comportamento do concreto nas situações propostas. Contudo, existem resultados de saturação que ultrapassam o valor máximo factível para essa variável, como por exemplo em [Soares et al. \(2016\)](#). Isso significa que mesmo que a tendência de evolução do resultado seja a esperada, os valores incorretos demonstram a existência de alguma incoerência ou limitação do modelo. Utilizando essa motivação, o presente trabalho propõe-se a realizar uma revisão bibliográfica e matemática do modelo, além de um estudo detalhado de variáveis relacionadas diretamente com a saturação, seguidos das considerações finais e perspectivas futuras.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O concreto resiste por longos períodos aos efeitos de altas temperaturas, pois mesmo características de resistência inferiores ao padrão são suficientes para garantir estabilidade ao local,

até que providências para reestabelecer os critérios de segurança sejam adotadas.

A composição do concreto é um dos fatores que mais deve ser levado em consideração ao estudar a resposta desse material a solicitações térmicas. Pois tanto a pasta de cimento quanto os agregados são formados por constituintes que se decompõe e se alteram, em graus diferenciados, com a exposição ao calor. A umidade inicial, o tamanho da peça e a taxa de aumento da temperatura também são fatores influentes, uma vez que governam o desenvolvimento de pressões internas dos produtos gasosos de decomposição, (Mehta e Monteiro, 2006).

Serão abordados a composição do concreto e o comportamento de seus componentes com relação à temperatura. Também serão discutidas as transformações físicas e químicas, o comportamento mecânico e os fenômenos de transferência de calor e massa no concreto quando submetido a um carregamento térmico.

2.1 Estruturas de concreto

O concreto é um material compósito, formado basicamente por uma mistura de cimento Portland com areia, brita e água. O cimento é o material que quando hidratado possui características coesivas. Já a areia e a brita são os agregados, materiais granulares cuja dosagem é variada para obter diferentes tipos de concreto, os quais são classificados de acordo com a sua resistência à compressão, podendo essa classificação variar de baixa a alta resistência, ou desempenho.

Macroscopicamente, o concreto é tratado como um material heterogêneo composto por duas fases, agregados e pasta de cimento, distribuídas irregularmente no espaço. Contudo, segundo Mehta e Monteiro (2006), para uma pasta de cimento bem hidratada, esta distribuição não homogênea pode ser ignorada na construção de um modelo de comportamento do material.

Por outro lado, microscopicamente, a complexidade do material é muito grande e não se deve generalizar essa simplificação. Isso porque costuma ser justamente na ligação entre o agregado e a pasta de cimento o ponto fraco do material quando solicitado por um carregamento. É por isso que, ainda segundo Mehta e Monteiro (2006), a interface, ou zona de transição, entre os agregados graúdos e a pasta de cimento costuma ser considerada como a terceira fase da estrutura de concreto.

2.1.1 Pasta de cimento hidratado

O cimento Portland é um pó cinza, composto principalmente por clínquer, que quando misturado à água forma uma pasta que adquire resistência mecânica através de reações químicas e do processo de hidratação. Essa pasta é formada, principalmente, por dois hidratos: o silicato de cálcio hidratado, CSH , ou $(CaO.2SiO_2.3H_2O)$, que é responsável pela resistência do concreto, e o hidróxido de cálcio, ou $Ca(OH)_2$, também chamada de portlandita. A desidratação pela elevação de temperatura atinge ambos os compostos, produzindo anidros e adicionando vapor de água à fase fluida.

2.1.2 Água

A água pode estar presente no concreto em várias formas, sendo classificada de acordo com a dificuldade de retirá-la. Ela pode ser encontrada como vapor presente nos vazios e ainda como: água capilar, a qual permanece nos vazios após o fim da hidratação do concreto; água absorvida, que está fisicamente ligada a superfícies sólidas; água interlamelar, a qual está associada ao silicato de cálcio hidratado (CSH); e água quimicamente ligada, que faz parte da composição química dos hidratos da pasta de cimento.

2.1.3 Agregados

Agregado é definido como o material granular, como areia, brita, seixo rolado, escória de alto forno, ou resíduos de construção e demolição. Eles influenciam em características do concreto como a retração e resistência à abrasão, e, por isso, são responsáveis, em grande parte, pela resistência mecânica do concreto. São, normalmente, materiais inertes, responsáveis predominantemente pelo peso e módulo de elasticidade do concreto.

Com o aumento da temperatura, ocorrem expansões diferenciais do agregado em relação à pasta de cimento que podem ser destrutivas para o material. Segundo [Ferreira \(2011\)](#), essas expansões podem causar microfissuras e contribuir para o *spalling*.

2.2 Comportamento sob temperaturas elevada

Por ser um material compósito heterogêneo, o concreto, quando submetido a temperaturas elevadas, comporta-se de maneira mais complexa. Para descrever bem esse comportamento, é preciso que, além das propriedades térmicas, sejam considerados também a fissuração e o fenômeno do *spalling*, ambos causados pelas tensões que a temperatura gera na fase sólida e pela pressão exercida pela fase fluida nos poros.

Faz-se então necessário, observar os fenômenos de transferência térmica, de escoamento das espécies fluidas (ar seco, água líquida, vapor d'água), de hidratação e desidratação da matriz e os efeitos termo-mecânicos, para que se possa compreender todas as modificações na microestrutura do concreto.

2.2.1 Fenômeno do lascamento ou *spalling*

Spalling é o processo de esfacelamento de fragmentos da superfície do concreto em resposta a exposição à altas temperaturas ou pressão. Ele pode levar a uma grande degradação do material, podendo prejudicar de modo significativo sua capacidade estrutural.

Esse fenômeno é atribuído a dois processos, ([Mindeguia et al., 2010](#)):

- Processo termo-mecânico: caracterizado pelos altos gradientes de temperatura, principalmente nos primeiros centímetros da superfície exposta. Estes gradientes podem ser muito importantes nos casos de aquecimento rápido, como no caso de um incêndio, e induzem à altas tensões de compressão próximo à superfície exposta. Estas tensões podem localmente ultrapassar a resistência do concreto e causar a ejeção de pedaços.
- Processo termo-hídrico: é associado ao transporte de massa no meio poroso, o qual pode gerar altas pressões de vapor. A Fig. (1) mostra o mecanismo do *spalling* ligado a pressão de vapor. Quando o concreto é exposto a uma alta temperatura, a água que se encontra nos poros como água capilar ou absorvida começa a evaporar. Uma parte dessa água vaporizada vai em direção a superfície aquecida, e outra parte migra para as zonas mais frias no interior, e depois se condensa. Como consequência, uma obstrução é gradualmente formada pelo acúmulo de umidade nessa região. Essa barreira é chamada *moisture clog*, e é considerada uma região do concreto com grande teor de água, que impede o escoamento dos fluidos da zona mais quente para a mais fria, fazendo com que a pressão nos poros da zona aquecida aumente. Estas pressões podem ultrapassar localmente a resistência à tração do concreto e iniciar o *spalling*.

Os concretos de alto desempenho (CAD) sofrem mais com o *spalling* explosivo. Isso acontece pois escoamento dos fluidos no CAD é dificultado, já que esse tipo de material possui

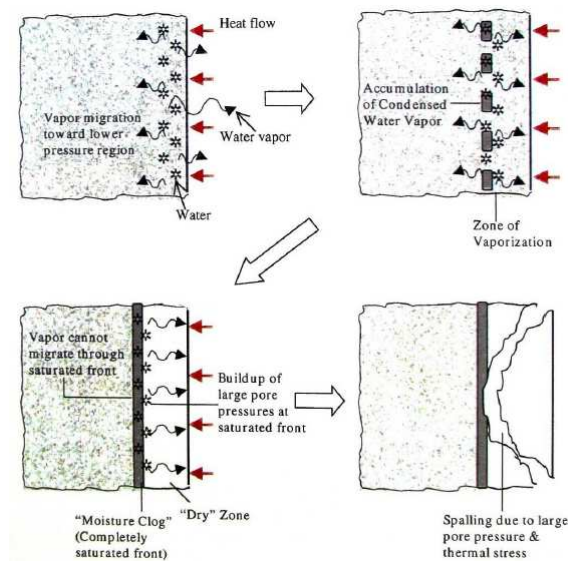


Figura 1: Ilustração do mecanismo de *spalling* (Consolazio et al., 1997)

menor permeabilidade e porosidade que o concreto comum. Consequentemente, ocorre o desenvolvimento de pressões mais altas no interior dos poros.

2.2.2 Condutividade térmica do concreto

Em um meio sólido, quando há um gradiente de temperatura, o calor flui através da condução. Tal evento é representado pela Lei de Fourier em que o fluxo de calor (q_λ) é proporcional ao gradiente de temperatura na direção (x) multiplicada pela área através da qual o calor é transferido (A). A Eq. (1) mostra essa relação, onde λ representa a propriedade do meio chamada condutividade térmica, que descreve a capacidade de um material de conduzir calor.

$$q_\lambda = -\lambda \cdot A \cdot \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

No concreto, essa capacidade depende principalmente da mineralogia dos agregados, do teor de umidade, da densidade e da temperatura do concreto. A condutividade térmica da pasta de cimento saturada é menor que a da maioria dos agregados, logo quanto mais agregado houver no concreto, menor será a sua condutividade, (Bazant e Kaplan, 1996).

A quantidade de ar nos poros do concreto também interfere na sua resposta à condução térmica. Por se tratar de um material isolante, a tendência é que quanto maior sua quantidade menor seja a capacidade de condução. De maneira geral, a condutividade térmica do concreto diminui com o aumento da temperatura, devido ao processo de desidratação.

Existem diversas propostas de curvas, entre elas (Gawin et al., 1998), Ranc et al. (2003) e Nguyen (2013), sendo essa última a utilizada no presente trabalho. A norma europeia para cálculo de estruturas em concreto fornece duas curvas técnicas, dadas pelas Eq. (2) e Eq. (3), que limitam a evolução da condutividade térmica em função da temperatura para concretos com densidade entre 2000 e 2600 kg/m^3 .

$$\lambda_{inf} = 1.36 - 0.36 \left(\frac{T}{100} \right) + 0.0057 \left(\frac{T}{100} \right)^2 \quad (2)$$

$$\lambda_{sup} = 2 - 0.2451 \left(\frac{T}{100} \right) + 0.0107 \left(\frac{T}{100} \right)^2 \quad (3)$$

Sendo λ_{inf} e λ_{sup} os limites inferior e superior da condutividade térmica, em $W/(mK)$, respectivamente. A temperatura é representada por T em $^{\circ}C$. As equações são válidas para temperaturas entre $20^{\circ}C$ e $1200^{\circ}C$.

2.2.3 Calor específico do concreto

O calor específico é uma grandeza que caracteriza cada substância e é determinada pela quantidade de energia necessária para elevar em um grau Kelvin a temperatura de uma unidade de massa do material. Para o concreto seco de agregado sílico-calcários tem-se a seguinte variação em função da temperatura dada pela norma europeia, Eq. (4):

$$c_p(T) = \begin{cases} 900, & T \in [20, 100), \\ 900 + (T - 100) & T \in [100, 200), \\ 900 + \left(\frac{T - 100}{2} \right) & T \in [200, 400), \\ 1100 & T \in [400, 1200) \end{cases} \quad (4)$$

2.2.4 Porosidade

A porosidade é definida como uma relação entre o volume de vazios e o volume total do material. O concreto possui uma porosidade inicial que é função da composição do material (traço), do processo de adensamento e cura. Segundo [Ferreira \(2011\)](#), essa porosidade tende a aumentar com a elevação da temperatura. Essa variação ocorre devido à desidratação da pasta de cimento e aumento de poros na mesma, mas também pode ser gerado pela evolução da microfissuração. Em casos de aquecimento ambos os fenômenos costumam acontecer juntos. Neste trabalho, por tratar do domínio termo-hídrico, a porosidade é função apenas da desidratação, como será mostrado adiante.

2.2.5 Permeabilidade

No concreto, a permeabilidade mensura a facilidade com a qual o material poroso é capaz de transferir fluidos sob um gradiente de pressão. Ocorre um fluxo de fluido por uma rede porosa que compreende a porosidade inicial do material e as fissuras que aparecem devido às solicitações termo-mecânicas ([Rostasy et al., 1980](#)). Normalmente, a fissuração e o aumento da porosidade interconectam canais de fluxo, o que resulta no aumento da permeabilidade.

3 MODELO FÍSICO E FORMULAÇÃO TERMO-HÍDRICA

O objetivo desta seção é apresentar o modelo termo-hídrico estudado que descreve o transporte acoplado de umidade e calor no concreto submetido a temperaturas elevadas. Tal modelo foi desenvolvido no CEA por [Sercombe et al. \(2001\)](#) e concluído no L2MGC por [de Morais et al. \(2006a\)](#).

3.1 Hipóteses Gerais

As hipóteses principais do modelo são:

Hipótese 1. O concreto é considerado um meio poroso, homogêneo não saturado e isotrópico de volume total V_t . O volume total é dividido em três fases:

- A fase gasosa - representada por V
- A fase líquida - representada por L
- A fase sólida - representada por S

A Fig. (2) representa os pontos da Hipótese 1.

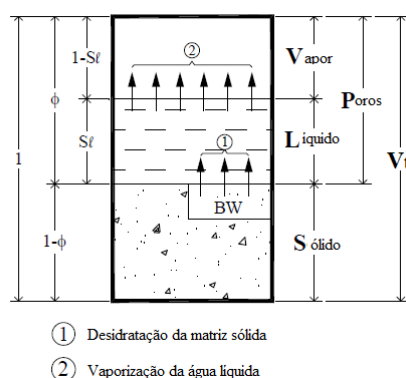


Figura 2: Repartição volumétrica das diferentes fases do concreto

Considerando a divisão do domínio proposta, é possível estabelecer alguns índices físicos e relações de massa e volume.

O volume de vazios é definido como (V_{vazios}):

$$V_{vazios} = V_v + V_l. \quad (5)$$

A porosidade (ϕ), é definida pela Eq. (6), a partir da relação entre o volume de vazios (V_{vazios}) e o volume total (V_t), e permite descrever globalmente o meio poroso, livre de detalhes sobre a distribuição e conectividade dos poros.

$$\phi = \frac{V_{vazios}}{V_t} \quad (6)$$

A saturação (S_l) é a relação entre o volume ocupado pela fase líquida (V_l) e o volume de vazios (V_{vazios}), e é dada pela Eq. (7).

$$S_l = \frac{V_l}{V_{vazios}} \quad (7)$$

Escrevendo o volume de vazios (V_{vazios}) em função da porosidade (ϕ) de acordo com a Eq. (6) e substituindo na Eq. (7), obtém-se a fração de volume poroso ocupado pela fase líquida (ϕ_l):

$$\phi_l = \frac{V_l}{V_t} = \phi S_l. \quad (8)$$

Tomando a definição de volume de vazios, Eq. (5), é possível reescrever a porosidade como:

$$\phi = \frac{V_v + V_l}{V_t} = \frac{V_v}{V_t} + \frac{V_l}{V_t}, \quad (9)$$

substituindo a Eq. (8) na Eq. (9) e reorganizando, tem-se a fração de volume poroso ocupado pela fase gasosa (ϕ_v):

$$\phi_v = \frac{V_v}{V_t} = \phi(1 - S_l). \quad (10)$$

Utilizando as Eq. (8) e (10), deduzem-se as massas de cada fase fluida por unidade de volume do meio poroso (massa volumétrica aparente), a massa de água líquida (m_l), a massa de vapor de água (m_v). E ainda a massa de água total (m_f) e também a massa da fase sólida (m_s):

$$m_l = \rho_l \phi S_l, \quad (11)$$

$$m_v = \rho_v \phi (1 - S_l), \quad (12)$$

$$m_f = m_l + m_v, \quad (13)$$

$$m_s = m_c + m_g + m_{bw} \quad (14)$$

onde ρ_l e ρ_v são as massas volumétricas da fase líquida e de vapor, respectivamente. A massa de cimento é m_c , a de agregados m_g e m_{bw} é a massa de água ligada a matriz sólida. Ela pode ser calculada em função da massa de água inicial ligada (d_0) e da massa de água livre proveniente da desidratação da fase sólida (d),

$$m_{bw} = d_0 - d. \quad (15)$$

É importante ressaltar que a porosidade (ϕ) depende da desidratação, ela é função da perda de água ligada da matriz sólida para a fase fluida, $\phi = \phi(d)$. A massa de água proveniente da desidratação é função da temperatura.

Hipótese 2. A evolução do sistema é muito lenta. Logo, as acelerações (termos de segunda ordem das equações diferenciais) serão desconsideradas e o estado do meio poroso será quase estático.

Hipótese 3. O fenômeno de histerese das curvas de adsorção e dessorção não são considerados. A relação entre a saturação (S_l) e a umidade relativa (h_r) é:

$$h_r = S_l \quad (16)$$

Hipótese 4. As transformações hídricas que ocorrem no concreto são ilustradas por duas mudanças de estado:

- A transformação de fase de água ligada em água líquida, a qual é causada pela desidratação da fase sólida (variação de d), representada por ① na Fig. (2).
- A transformação de fase de água líquida em vapor de água causada pela vaporização da água, representada por ② na Fig. (2).

Hipótese 5. As deformações do esqueleto sólido não são consideradas.

Hipótese 6. As transformações ocorridas no esqueleto sólido são infinitesimais.

Hipótese 7. A fase gasosa se comporta como um gás perfeito.

Hipótese 8. As leis de condução de calor e massa fluida são desacopladas.

3.2 Conservação de massa

Inicialmente, é tomada uma forma diferencial da conservação de massa, a qual é aplicada separadamente a fase líquida e a fase gasosa da água separadamente. Essas equações são desenvolvidas e em seguida somadas para se obter o balanço geral da massa de água no volume de controle.

3.2.1 Parcela de massa de água líquida

A variação da quantidade de água líquida em função do tempo no volume V_t é descrita por $\frac{d}{dt} \int_{V_t} m_l dV_t$, aplicando o Teorema de Reynolds é possível escrever:

$$\frac{d}{dt} \int_{V_t} m_l dV_t = \int_{V_t} \frac{\partial m_l}{\partial t} dV_t + \int_{\partial V_t} m_l \vec{v}_l \cdot d(\vec{\partial V}_t). \quad (17)$$

onde \vec{v}_l é a velocidade do fluido na fase.

Aplicando o teorema de Green que é definido como,

$$\int_{Superficie} \vec{a} \cdot \vec{n} dS = \int_{Volume} \nabla \cdot \vec{a} dV, \quad (18)$$

e fazendo

$$\begin{cases} \vec{a} = m_l \vec{V}_l \\ \vec{n} dS = d\vec{\partial V}_t \end{cases} \quad (19)$$

tem-se:

$$\int_{\partial V_t} m_l \vec{v}_l \cdot d(\vec{\partial V}_t) = \int_{V_t} \nabla \cdot m_l \cdot \vec{v}_l dV_t \quad (20)$$

Substituindo na Eq. (17), obtém-se:

$$\frac{d}{dt} \int_{V_t} m_l dV_t = \int_{V_t} \left(\frac{\partial m_l}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{J}_l \right) dV_t \quad \text{onde} \quad \vec{J}_l = m_l \cdot \vec{v}_l \quad (21)$$

A variação da massa de água líquida está relacionada ao acréscimo de massa ligado à desidratação da fase sólida $\frac{\partial d}{\partial t}$, e a perda de massa relativa a taxa de vaporização da água líquida representada por $\mu_{l \rightarrow v}$. A equação da conservação da massa de água líquida é dada abaixo:

$$\frac{d}{dt} \int_{V_t} m_l dV_t = \int_{V_t} \left(\frac{\partial d}{\partial t} - \mu_{l \rightarrow v} \right) dV_t. \quad (22)$$

Comparando as Eq. (21) e (22), conclui-se que:

$$\frac{\partial m_l}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{J}_l = \frac{\partial d}{\partial t} - \mu_{l \rightarrow v} \quad (23)$$

3.2.2 Parcela da massa de vapor de água

Através de um desenvolvimento análogo, obtém-se a equação da conservação da massa de vapor:

$$\frac{\partial m_v}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{J}_v = \mu_{l \rightarrow v} \quad (24)$$

onde $\mu_{l \rightarrow v}$ define a taxa de massa inserida na fase gasosa pela vaporização da água líquida.

Somando as Eq. (23) e (24), a equação de conservação da massa de água total é dada por:

$$\nabla \cdot (\vec{J}_l + \vec{J}_v) + \frac{\partial m_l}{\partial t} + \frac{\partial m_v}{\partial t} = \frac{\partial d}{\partial t} \quad (25)$$

A partir de agora cada termo da Eq. (25) será desenvolvido individualmente.

3.2.3 Termo $\nabla \cdot (\vec{J}_l + \vec{J}_v)$

O movimento do gás e do líquido em um meio poroso, desprezando-se os efeitos gravitacionais e qualquer anisotropia do material, pode ser descrito pela Lei de Darcy:

$$\vec{J}_i = -\rho_i \frac{K_i k_{ri}(S_i)}{\eta_i} \nabla(P_i), \quad (26)$$

onde $i = l, v$ representam o fluxo de líquido ou vapor, K_i é a permeabilidade intrínseca da fase, k_{ri} é a permeabilidade relativa à fase considerada, η_i é a viscosidade dinâmica e P_i é a pressão.

Substituindo a Eq. (26) para o fluxo de líquido e vapor no termo $\nabla \cdot (\vec{J}_l + \vec{J}_v)$ da Eq. (25), tem-se:

$$\nabla \cdot (\vec{J}_l + \vec{J}_v) = -\nabla \cdot \left(\rho_l \frac{K_l k_{rl}(S_l)}{\eta_l} \nabla(P_l) + \rho_v \frac{K_v k_{rv}(S_v)}{\eta_v} \nabla(P_v) \right) \quad (27)$$

A Lei de Kelvin exprime o equilíbrio entre a fase líquida e de vapor através da igualdade dos seus potenciais químicos, com ela é possível escrever uma relação entre P_l e P_v .

$$P_l = P_{vs}(T) + \frac{\rho_l RT}{M_v} \ln \frac{P_v}{P_{vs}(T)} \quad (28)$$

Derivando a Eq. (28) em relação a P_v , pode-se deduzir que:

$$\frac{\partial P_l}{\partial P_v} = \rho_l \frac{RT}{M_v P_v} \quad (29)$$

Considerando a fase de vapor como um gás perfeito, pode-se utilizar a Equação de Clapeyron:

$$PV = nRT \quad (30)$$

$$\frac{V}{n} = \frac{RT}{P} \quad (31)$$

Substituindo $V = m/\rho$, tem-se:

$$\frac{m}{\rho n} = \frac{RT}{P} \quad (32)$$

onde $M = m/n$, e M é a massa molar. Reescrevendo essa relação para a fase de vapor:

$$\frac{1}{\rho_v} = \frac{RT}{PM_v} \quad (33)$$

e substituindo a Eq. (33) na Eq. (29):

$$\frac{\partial P_l}{\partial P_v} = \frac{\rho_l}{\rho_v}, \quad (34)$$

de maneira análoga:

$$\nabla \vec{P}_l = \frac{\rho_l(T)}{\rho_v(T)} \nabla \vec{P}_v \quad (35)$$

Finalmente, pode-se deduzir ao aplicar a Eq. (35) na Eq. (27), que:

$$\nabla \cdot (\vec{J}_l + \vec{J}_v) = -\nabla \cdot \left(\rho_l \frac{K_l k_{rl}(S_l)}{\eta_l} + \rho_v \frac{K_v k_{rv}(S_v)}{\eta_v} \right) \nabla \vec{P}_v. \quad (36)$$

Sabe-se que a umidade relativa é definida como:

$$h_r = \frac{P_v}{P_{vs}}, \quad (37)$$

considerando a *Hipótese 3*, segundo a qual:

$$h_r = S_l, \quad (38)$$

é possível escrever:

$$h_r = S_l = \frac{P_v}{P_{vs}}, \quad (39)$$

e então:

$$\frac{\partial P_v}{\partial S_l} = P_{vs}. \quad (40)$$

Por fim, reescreve-se a Eq. (36) como:

$$\nabla \cdot (\vec{J}_l + \vec{J}_v) = -\nabla \cdot \left(\rho_l \frac{K_l k_{rl}(S_l)}{\eta_l} + \rho_v \frac{K_v k_{rv}(S_v)}{\eta_v} \right) P_{vs} \nabla \vec{S}_l \quad (41)$$

3.2.4 Termo $\frac{\partial m_l}{\partial t} + \frac{\partial m_v}{\partial t}$

O primeiro passo para o desenvolvimento desse termo é substituir m_l e m_v pelas relações obtidas pelo volume, Eq. (11) e (12), substituindo na Eq. (25), obtém-se:

$$\frac{\partial m_l}{\partial t} + \frac{\partial m_v}{\partial t} = \underbrace{\rho_l S_l \frac{\partial \phi}{\partial t}}_{\text{Termo 1}} + \underbrace{\phi S_l \frac{\partial \rho_l}{\partial t}}_{\text{Termo 2}} + \underbrace{\phi \rho_l \frac{\partial S_l}{\partial t}}_{\text{Termo 3}} + \underbrace{\rho_v (1 - S_l) \frac{\partial \phi}{\partial t}}_{\text{Termo 4}} + \underbrace{\phi (1 - S_l) \frac{\partial \rho_v}{\partial t}}_{\text{Termo 5}} - \underbrace{\phi \rho_v \frac{\partial S_l}{\partial t}}_{\text{Termo 6}} \quad (42)$$

Os termos (1) e (4) serão descartados seguindo a hipótese que $\frac{\partial \phi}{\partial t}$ é muito pequeno em relação aos outros termos. O termo (5) será desconsiderado, pois é adotado que ρ_v é constante,

logo $\frac{\partial \rho_v}{\partial t}$. Os termos (3) e (6) fazem aparecer à capacidade hídrica $\phi(\rho_l - \rho_v)$. Já o termo (2) será tratado posteriormente. Logo, tem-se:

$$\frac{\partial m_l}{\partial t} + \frac{\partial m_v}{\partial t} = \phi(\rho_l - \rho_v) \frac{\partial S_l}{\partial t} + \underbrace{\phi S_l \frac{\partial \rho_l}{\partial t}}_{\text{Termo 2}} \quad (43)$$

Substituindo as Equações (41) e (43), na Equação (25), obtém-se a seguinte forma da equação da conservação da massa:

$$\phi(\rho_l - \rho_v) \frac{\partial S_l}{\partial t} + \underbrace{\phi S_l \frac{\partial \rho_l}{\partial t}}_{\text{Termo 2}} = \nabla [D_h(S_l, d, T) \vec{\nabla} S_l] + \frac{\partial d}{\partial t} \quad (44)$$

onde D_h é a condutividade hídrica e é expressa por:

$$D_h(S_l, d, T) = \nabla \cdot \left[\rho_l \frac{K_l k_{rl}(S_l)}{\eta_l} + \rho_v \frac{K_v k_{rv}(S_v)}{\eta_v} \right] \cdot p_{vs} \quad (45)$$

3.3 Conservação de energia

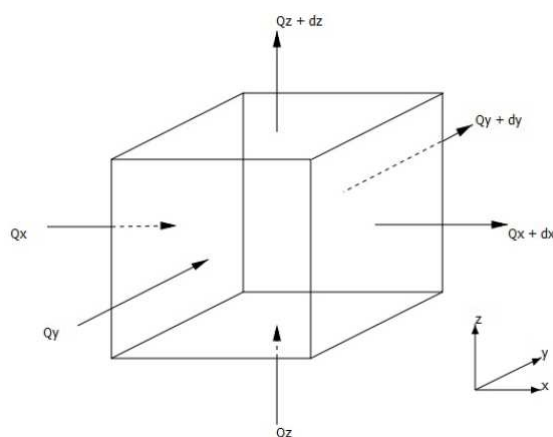


Figura 3: Balanço de energia no volume de controle

Dado o volume de controle da Fig. (3), o fluxo de calor, Q , pode ser escrito por expansão de Taylor com os termos de ordem superior desprezados como:

$$\begin{aligned} Q_{x+dx} &= Q_x + \frac{\partial Q_x}{\partial x} dx \\ Q_{y+dy} &= Q_y + \frac{\partial Q_y}{\partial y} dy \\ Q_{z+dz} &= Q_z + \frac{\partial Q_z}{\partial z} dz \end{aligned} \quad (46)$$

O balanço de energia escrito como *energia que entra + energia gerada = variação de energia estocada + energia que sai*. Se o calor gerado dentro do volume de controle é dado por $Gdxdydz$, e a taxa de mudança da energia estocada é $\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} dxdydz$, tem-se a seguinte equação:

$$Q_x + Q_y + Q_z + Gdxdydz = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} dxdydz + Q_{x+dx} + Q_{y+dy} + Q_{z+dz}. \quad (47)$$

Substituindo a Eq. (1) na Eq. (47), tem-se:

$$-\frac{\partial Q_x}{\partial x}dx - \frac{\partial Q_y}{\partial y}dy - \frac{\partial Q_z}{\partial z}dz + Gdxdydz = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t}dxdydz \quad (48)$$

O fluxo de calor na direção x é dado por $q_x = -\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x}$, escrevendo as equações para as outras direções de forma análoga, é possível escrever o fluxo total de calor, Q , em cada direção como:

$$\begin{aligned} Q_x &= q_x dydz = -\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} dydz \\ Q_y &= q_y dxdz = -\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} dxdz \\ Q_z &= q_z dxdy = -\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} dxdy \end{aligned} \quad (49)$$

Ao substituir a Eq. (49) na Eq. (48), e dividindo tudo por $dxdydz$, obtém-se:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + G = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (50)$$

A Eq. (50), é a equação do balanço de energia que trata da condução de calor transiente em um sistema de coordenadas cartesianas. A condutividade térmica, λ , pode ser expressa como um tensor. Considerando a *Hipótese 1*, o meio poroso é homogêneo, logo o tensor de condutividade é isotrópico para cada fase e pode-se escrever que $\lambda = \lambda_x + \lambda_y + \lambda_z$.

Neste modelo, as fontes geradoras de calor consideradas são as mudanças de estado endotérmicas da água, da água líquida para vapor e de água quimicamente ligada para líquida. Assim, G será escrito como:

$$G = L_{l \rightarrow v}(T) \mu_{l \rightarrow v} + L_{s \rightarrow l} \frac{\partial d}{\partial t}. \quad (51)$$

Onde $L_{l \rightarrow v}(T)$ e $L_{s \rightarrow l}$ são os calores latentes de vaporização e desidratação (J/kg), $\mu_{l \rightarrow v}$ é a quantidade de água vaporizada por unidade de tempo ($kg/m^3/s$) e $\frac{\partial d}{\partial t}$ é a cinética de desidratação ($kg/m^3/s$).

Por último, o termo ρc_p da Eq. (50) é denominado calor específico volumétrico. Ele pode ser escrito como $c = \rho c_p$, que será função da saturação e da desidratação. Substituindo, tem-se a equação do balanço de energia do modelo:

$$c(S_l, d) \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda(T) \nabla T) - L_{l \rightarrow v}(T) \mu_{l \rightarrow v} + L_{s \rightarrow l} \frac{\partial d}{\partial t} \quad (52)$$

O calor transportado por convecção pelos fluidos é desprezado nessa formulação, fato que acontece quando o material é pouco permeável como o concreto. Além disso, a dissipação de calor associada à compressibilidade do vapor de água é desprezada, visto que esse é tratado como um gás perfeito.

O calor específico volumétrico é dado por:

$$c(S_l, d) = \rho_s C_s + \phi \rho_l(T) S_l C_l + (d_0 - d) C_u \quad (53)$$

onde C_s , C_l e C_u são os calores específicos da fase sólida, líquida e da água ligada, respectivamente, em ($J/kg^\circ C$).

4 DISCRETIZAÇÃO DAS EQUAÇÕES

As equações diferenciais Eq. (44) e Eq. (52) formam um sistema de duas equações e duas incógnitas, temperatura (T) e saturação (S_l), o qual descreve o fenômeno acoplado de transferência de calor e umidade.

$$\begin{cases} \phi(\rho_l - \rho_v) \frac{\partial S_l}{\partial t} + \underbrace{\phi S_l \frac{\partial \rho_l}{\partial t}}_{\text{Termo 2}} = \nabla [D_h(S_l, d, T) \vec{\nabla} S_l] + \frac{\partial d}{\partial t} \\ c(S_l, d) \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda(T) \nabla T) - L_{l \rightarrow v}(T) \mu_{l \rightarrow v} + L_{s \rightarrow l} \frac{\partial d}{\partial t} \end{cases} \quad (54)$$

Após a discretização temporal, $t_i = i\Delta t$, $i \in [0, 1, 2, \dots, n]$ onde $n = \frac{t_{max}}{\Delta t} + 1$, é possível reescrever o termo(2) como:

$$termo(2) = \frac{\partial \rho_l}{\partial t} \phi \cdot S_l = [(\rho_l)_{i+1} - (\rho_l)_i] \cdot \underbrace{\phi \cdot \frac{(S_l)_{i+1} - (S_l)_i}{\Delta t}}_{\partial S_l / \partial t} + [(\rho_l)_{i+1} - (\rho_l)_i] \cdot \phi \cdot \frac{(S_l)_i}{\Delta t} \quad (55)$$

Ao substituir a Eq. (55) na Eq. (44), obtém-se:

$$\phi((\rho_l)_{i+1} - (\rho_v)_{i+1} + (\rho_l)_{i+1} - (\rho_l)_i) \frac{\partial S_l}{\partial t} - \nabla [D_h(S_l, d, T) \vec{\nabla} S_l] = \frac{\partial d}{\partial t} - [(\rho_l)_{i+1} - (\rho_l)_i] \cdot \phi \cdot \frac{(S_l)_i}{\Delta t} \quad (56)$$

Reorganizando o sistema, é possível observar que ambas as equações possuem a mesma estrutura:

$$\begin{cases} \phi((\rho_l)_{i+1} - (\rho_v)_{i+1} + (\rho_l)_{i+1} - (\rho_l)_i) \frac{\partial S_l}{\partial t} - \underbrace{\nabla [D_h(S_l, d, T) \vec{\nabla} S_l]}_{\text{Difusão}} = \underbrace{\frac{\partial d}{\partial t} - [(\rho_l)_{i+1} - (\rho_l)_i] \cdot \phi \cdot \frac{(S_l)_i}{\Delta t}}_{\text{Fonte}} \\ c(S_l, d) \frac{\partial T}{\partial t} - \underbrace{\nabla \cdot (\lambda(T) \nabla T)}_{\text{Difusão}} = \underbrace{-L_{l \rightarrow v}(T) \mu_{l \rightarrow v} + L_{s \rightarrow l} \frac{\partial d}{\partial t}}_{\text{Fonte}} \end{cases} \quad (57)$$

O sistema final apresentado na Eq. (57) é implementado no Cast3M, um código de cálculo livre que utiliza o método dos elementos finitos. As equações são tratadas de forma independente uma da outra e resolvidas por um método de diferenças finitas através de um esquema semi-implícito de Euler, após a discretização espacial através do método dos elementos finitos realizada diretamente pelo Cast3M.

5 EXEMPLO DE APLICAÇÃO

Na sequência, serão apresentados as informações utilizadas para realizar o estudo do aquecimento de um corpo de prova cilíndrico, ilustrado na Fig. (4). Por se tratar de uma estrutura cilíndrica, foi utilizada a opção de cálculo axissimétrica. A geometria destacada representa a face de um quarto do corpo de prova.

Um carregamento térmico de $1^\circ C/min$ é aplicado nos lados externos da figura, representadas em vermelho. A temperatura inicial do material é de $20^\circ C$ e temperatura final será de $600^\circ C$. Já as linhas das bordas centrais, em amarelo, possuem fluxo nulo, respeitando as condições de simetria.

Para a implementação do modelo, devem ainda ser definidas as propriedades do material, além das condições iniciais e de contorno de saturação. Além disso, são determinadas a porosidade (ϕ_0) e a permeabilidade inicial (k_0).

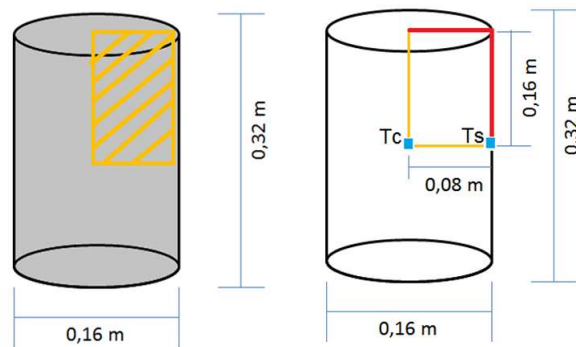


Figura 4: Esquema do corpo de prova estudado

5.1 Resultados numéricos

Serão apresentados os resultados de temperatura e saturação, incógnitas do problema tratado. Para validar os resultados de temperatura, foram utilizados dados obtidos de [Pliya \(2010\)](#).

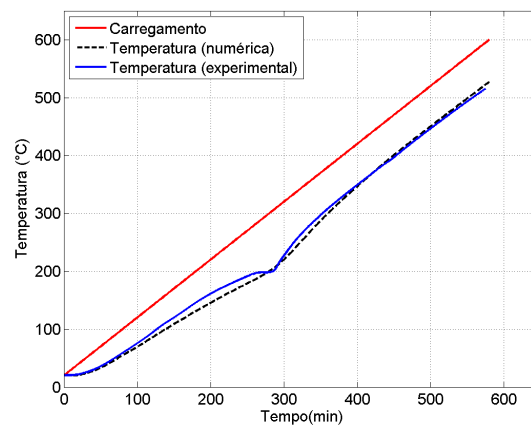


Figura 5: Resultados de temperatura

Na Fig. (5), tem-se a evolução de temperatura experimental e numérica no centro do corpo de prova e o carregamento aplicado. Nela é possível observar que a curva obtida numericamente obedece a tendência de evolução das temperaturas coletadas. Há, contudo, regiões nas quais existe uma maior diferença entre esses resultados. Tais perturbações ocorrem, pois a velocidade de aumento de temperatura nos pontos internos não é constante, e pode diminuir devido ao consumo da energia calorífica nos fenômenos de extração de água física ou quimicamente ligada, e de evaporação da água livre. De maneira geral, a proximidade entre as curvas mostradas na Fig. (5), indica que o modelo descreve bem o fenômeno estudado.

Como pode ser visto na Eq. (57), a saturação é uma das incógnitas que o modelo pretende resolver, e seu resultado é ilustrado na Fig. (6), a qual mostra a evolução da saturação em relação a temperatura para um ponto do centro do corpo de prova. Nessa figura nota-se que inicialmente a saturação aumenta, fato que pode ser justificado pela inserção de água pela desidratação da fase sólida, iniciada a 60°C , e também pela migração de vapor de água que sai da zona aquecida para a zona fria e volta a se condensar. Em seguida a saturação decai pois a água começa a ser vaporizada.

Entretanto, para determinadas temperaturas e pontos do domínio, ocorrem situações em que

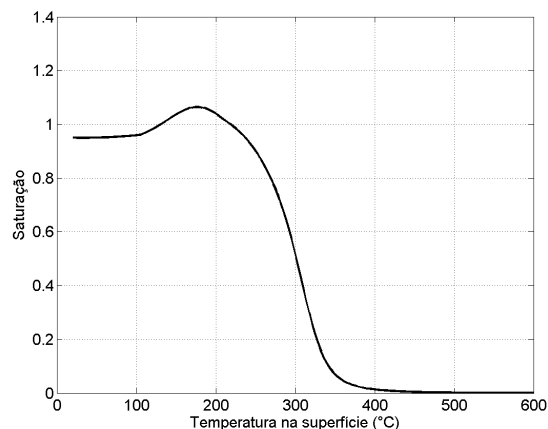


Figura 6: Resultados de saturação para o ponto no centro do corpo de prova

$S_l > 1$, cenário infactível fisicamente. Considerando a definição de saturação apresentada na Seção (3) e dada pela equação:

$$S_l = \frac{V_l}{V_{vazios}}. \quad (7)$$

Obter $S_l > 1$ significa que o volume líquido é maior que o volume de vazios, contudo isso não pode ocorrer, visto que o volume de vazios é dado pela soma do volume de líquido com o de vapor, Eq. (5). Logo, tem-se um resultado de saturação que representa bem o comportamento do fenômeno, apresentando uma curva bem característica, porém com valores que possuem um pequeno desvio.

O valor máximo retirado da curva da Fig. (6) é $S_l = 1.039$, considerando $S_l = 1$ o máximo admissível, tem-se que o erro cometido é de aproximadamente 4%, valor relativamente pequeno, mas que devido a interpretação física se torna passível de preocupação.

6 UMA DISCUSSÃO SOBRE OS RESULTADOS DE SATURAÇÃO

A partir desses resultados de saturação surgiu a necessidade de estudar mais detalhadamente certos aspectos do modelo, com o intuito de encontrar justificativas para esses resultados ou pontos passíveis de correção.

6.1 Ponto crítico da água

O ponto crítico de uma substância representa um ponto específico a uma determinada pressão e temperatura, a partir da qual não é possível distinguir as fases líquida e gasosa. Quando a substância se aproxima da temperatura crítica, as propriedades das duas fases envolvidas convergem e passam a ser definidas unicamente. Isso implica em mudança na forma com a qual as propriedades do fluido são descritas.

Segundo Van Wylen et al. (2009), a água possui temperatura crítica de $374,14^\circ\text{C}$. O exemplo de aplicação proposto tem um carregamento cuja temperatura máxima é de 600°C , assim, a primeira eventualidade a ser investigada foi a possibilidade da saturação exceder um para temperaturas acima da $T_{\text{crítica}}$. Todavia, essa suposição se provou equivocada, pois S_l ultrapassou 1 para temperaturas acima de 100°C no respectivo ponto. Isso pode ser melhor observado na Fig. (8), que apresenta os perfis de saturação para diversas temperaturas na superfície.

A partir dessa análise, percebe-se que o fato da temperatura ultrapassar a $T_{\text{crítica}}$ não influencia

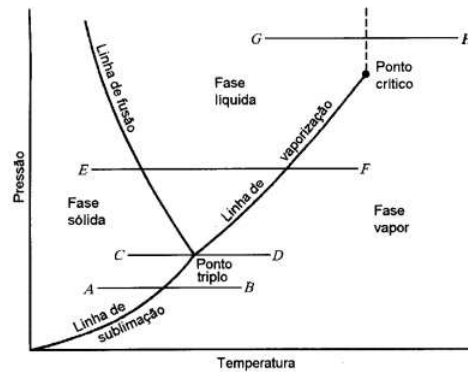


Figura 7: Diagrama pressão-temperatura para uma substância semelhante a água (Van Wylen et al., 2009)

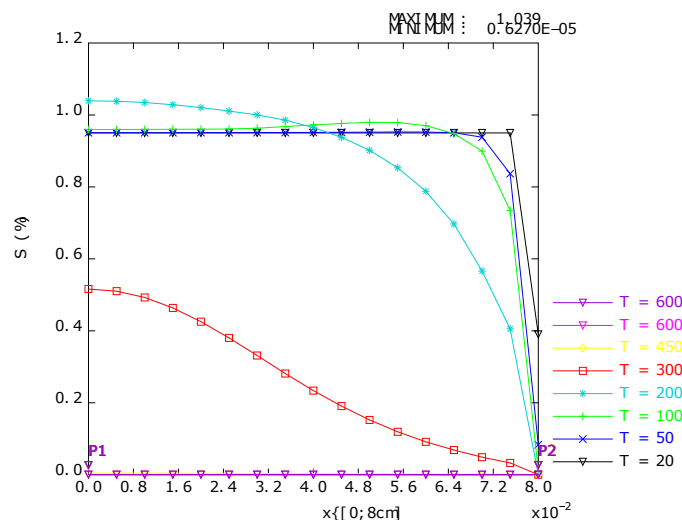


Figura 8: Saturation

diretamente nos resultados de saturação. Mas independentemente disso, para situações futuras serão considerados carregamentos com valores máximos inferiores à 374, 15°C.

6.2 Determinação da saturação inicial

Em seguida, foi averiguada a maneira como foi estipulada a condição inicial saturação. Na aplicação proposta nesse trabalho, a saturação inicial, teve seu valor definido pelo usuário para o interior e o contorno da geometria. Essa abordagem equivale experimentalmente a fixar uma saturação através da imersão do corpo de prova em água, até que ele atinja um determinado valor de saturação. Posteriormente, o corpo de prova pode ter sua superfície ligeiramente seca, alterando o valor da propriedade no contorno. Entretanto, há outro modo de fazer isso.

Considere uma amostra de concreto que foi submetida a uma técnica de cura e logo após utilizada em um processo de aquecimento, como o proposto no modelo estudado. Nesse caso, a saturação inicial deve ser calculada utilizando a massa líquida de água presente no corpo de prova. Relembrando a definição de saturação, Eq. (7), pode-se escrever a saturação inicial como:

$$S_{l0} = \frac{V_{l0}}{V_{v0}} \quad (58)$$

Da definição de porosidade, Eq. (6), é possível reescrever o $V_{v0} = \phi_0 \cdot V_{total}$, e da definição de massa volumétrica específica, tem-se $V_l = m_l / \rho_l$. Substituindo na Eq. (58), obtém-se:

$$S_{l0} = \frac{(m_{l0} / \rho_{l0})}{\phi_0 \cdot V_{total}} \quad (59)$$

Mesmo utilizando a Eq. (59) na definição da condição de contorno inicial, os resultados de saturação continuam atingindo valores superiores a um para algumas situações.

Depois de analisar o modo como os cálculos foram realizados e seu significado físico, é plausível afirmar que ambas as maneiras de definir essa condição inicial estão corretas e não acarretam os problemas nos resultados.

6.3 Fenômeno de desidratação da fase sólida

O processo de desidratação da pasta de cimento se traduz em perda de água por decomposição dos produtos resultantes da hidratação do cimento, o silicato de cálcio hidratado (CSH) e a portlandita ($Ca(OH)_2$). A desidratação transforma os hidratos em anidros, os quais possuem um volume menor que o dos hidratos iniciais, implicando consequentemente no aumento da porosidade. Outros efeitos da desidratação no concreto são a produção de água livre e o consumo de energia para a realização dessa mudança e fase.

Segundo Thi Thu Huong (2011), a decomposição do CSH se inicia a partir de $105^\circ C$. Entretanto, medidas efetuadas por Galle et al. (2000) em concretos comuns e de alto desempenho, mostram uma modificação significativa nos valores de porosidade a partir de $60^\circ C$. Neste trabalho, considera-se que ocorre extração de água da matriz cimentícia já nesta temperatura. Sendo assim, a evolução da quantidade de água ligada desidratada (d) é dada por:

$$d = 0,136 (T - 60) \text{ para } T > 60 \quad (60)$$

A Eq. (60), está inserida no algoritmo e é utilizada para definir a massa de água vinda da desidratação da fase sólida, e consequentemente estabelecer a evolução de porosidade.

Um teste realizado, foi fixar um caso em que não ocorreria a desidratação. Isso gera uma situação em que a saturação apenas decai, como ilustrado na Fig. (9):

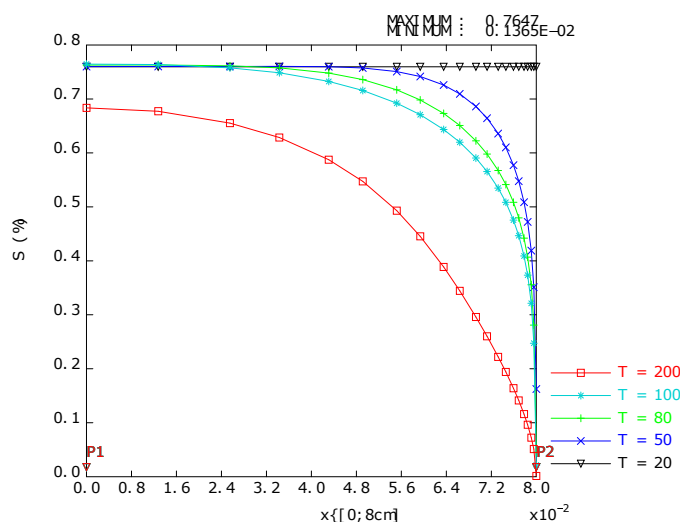


Figura 9: Perfis de saturação no raio da geometria

Nota-se que se não há desidratação, não ocorre inserção de água líquida no sistema, como consequência não há nenhuma região onde ocorre o aumento da saturação, como é esperado.

6.4 Evolução da porosidade

A porosidade do concreto evolui em função do crescimento do volume de poros. Considerando as hipóteses e restrições do modelo, esse aumento é função apenas da desidratação. A Eq. (61) descreve o comportamento dessa propriedade:

$$\phi(d) = \phi_0 + \frac{d}{\rho_{hid}} \quad (61)$$

onde ϕ_0 é a porosidade inicial, d a massa de água ligada desidratada e ρ_{hid} representa a massa específica volumétrica dos hidratos da pasta de cimento, cujo valor utilizado é $\rho_{hid} = 2280 \text{ kg/m}^3$.

O ρ_{hid} é relativo aos hidratos da pasta de cimento pois é justamente a desidratação desses que causará o aumento de volume de poros, responsável pela alteração da porosidade. Em [Nguyen \(2013\)](#), é utilizado $\rho_{hid}^* = 800 \text{ kg/m}^3$, densidade relativa a água em gel presente nos hidratos. A utilização desse valor implica em uma evolução mais rápida de porosidade, e assim gera um crescimento mais acelerado do volume de vazios, porém isso não ameniza o problema com os resultados de saturação.

6.5 Mudança de fase: líquido - vapor

De acordo com a *Hipótese 4*, o evento em estudo envolve duas mudanças de estado. Na subseção Fenômeno de desidratação da fase sólida foi investigada uma dessas mudanças de fases, por isso, esse tópico tratará exclusivamente da transformação de fase de água líquida para vapor de água.

A mudança de estado representada pela vaporização pode ocorrer de três formas distintas, definidas de acordo com a velocidade com a qual a transformação ocorre e com a quantidade de energia fornecida ao sistema, sendo elas a evaporação, a ebulição e calefação. No estudo realizado, considera-se que a mudança de fase ocorre apenas por evaporação e ebulição.

A energia envolvida na mudança de líquido para vapor é representada na Eq. (52) pelo termo $(-L_{l \rightarrow v}(T)\mu_{l \rightarrow v})$, onde $L_{l \rightarrow v}(T)$ representa o calor latente de vaporização (J/kg), e $\mu_{l \rightarrow v}$ é a quantidade de água vaporizada por unidade de tempo ($kg/m^3/s$). O calor latente é expresso pela seguinte curva:

$$L_{l \rightarrow v}(T) = \frac{2450,2502 - 6,433949 \times T}{1 - 0,0019057413 \times T - 7,0023846 \times 10^{-7} \times T^2} \times 10^3 \quad (62)$$

e representada na Fig. (10).

Definido o calor latente, a questão se torna como definir a quantidade de água vaporizada em cada instante de tempo. Para isso, é preciso retornar a Eq. (23), e reescrevê-la isolando o termo desejado.

$$\mu_{l \rightarrow v} = \frac{\partial d}{\partial t} - \frac{\partial m_l}{\partial t} - \nabla \cdot \vec{J}_l \quad (63)$$

A Eq. (63), deve ser discretizada e aplicada antes da resolução do sistema de Eq. (57).

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho se dispôs a investigar o modelo proposto por [Sercombe et al. \(2001\)](#) e concluído no L2MGC por [de Moraes et al. \(2006a\)](#). Foram apresentados os conceitos pertinentes

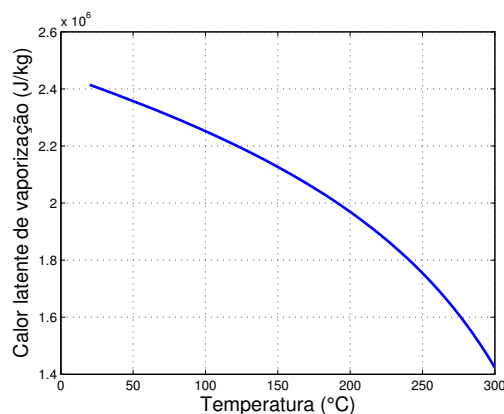


Figura 10: Calor latente de vaporização

ao fenômeno estudado e as hipóteses do modelo. Logo após, a formulação matemática utilizada foi detalhada e algumas particularidades da implementação numérica foram apontadas.

Dados experimentais de temperatura referentes a uma composição de concreto, foram utilizados para validar o modelo. Porém, apesar da qualidade dos resultados no que diz respeito a evolução dos resultados das incógnitas do problema, há um certo desvio nos valores obtidos para a saturação. Esses desvios, promoveram a necessidade de um estudo um pouco mais aprofundado da saturação e de pontos envolvidos no modelo que podem influenciar nos resultados.

Foram investigadas questões relativas ao ponto crítico da água, a maneira como a condição inicial de saturação é imposta, e ainda em relação as mudanças de fase compreendidas pelo evento em análise: a desidratação da fase sólida e a transformação da água líquida em vapor. Constatou-se que embora esses atributos influenciem no comportamento da saturação, da maneira com a qual eles foram utilizados, eles não acarretam problemas.

Como trabalhos futuros visualiza-se duas abordagens distintas: investigar as condições não estudadas nesse trabalho, e sugerir alterações no modelo para solucionar os problemas diagnosticados; ou propor um novo modelo que não possua as restrições causadas por suas hipóteses.

REFERÊNCIAS

- Bazant Z.P. e Kaplan M.F. *Concrete at high temperatures: material properties and mathematical models*. Longman, 1996.
- Consolazio G.R., McVay M., e Rish III J. Measurement and prediction of pore pressure in cement mortar subjected to elevated temperature. Em *Proceedings of the International Workshop on Fire Performance of High-Strength Concrete, NIST, Gaithersburg, Maryland*, páginas 125–148. 1997.
- de Moraes M.V., Bary B., Durand S., Ranc G., e Dal Pont S. Numerical analysis of coupled thermo-hydro-mechanical models for concrete exposed to moderate temperatures. Em *XXVIII Iberian Latin American Congress on Computational Methods in Engineering (CI-LAMCE 2007)*. Porto, Portugal. 2007.
- de Moraes M.V.G., Noumowé A., Kanema M., Gallias J.L., e Cabrillac R. Transferts thermohydriques dans un élément en béton exposé à une température élevée: Approches numérique et expérimentale. *24ème Rencontres Universitaires de Génie Civil (AUGC06)*, páginas 1–10, 2006a.
- de Moraes M.V.G., Noumowé A., Kanema M., Gallias J.L., e Cabrillac R. Transferts thermohydriques dans un élément en béton exposé à une température élevée: Approches numérique

- et expérimentale. *24ème Rencontres Universitaires de Génie Civil (AUGC06)*, páginas 1–10, 2006b.
- Ferreira A.P. *Modelagem dos Fenômenos de Transporte Termo-Hídricos em Meios Porosos Submetidos a Temperaturas Elevadas: Aplicação a uma bicamada rocha-concreto*. Masters thesis, Universidade Federal de Juiz de Fora, 2011.
- Galle C., Sercombe J., Pin M., Arcier G., e Bouniol P. Behavior of High Performance Concrete Under High Temperature (60-450 C) for Surface Long-Term Storage: Thermo-Hydro-Mechanical Residual Properties. *MRS Online Proceedings Library Archive*, 663, 2000.
- Gawin D., Majorana C.E., Pesavento F., e Schrefler B.A. A fully coupled multiphase FE model of hygro-thermo-mechanical behaviour of concrete at high temperature. Em *Computational Mechanics., Onate, E. & Idelsohn, SR (eds.), New Trends and Applications; Proc. of the 4th World Congress on Computational Mechanics, Buenos Aires*, páginas 1–19. 1998.
- Kanema M., Noumowe A., Gallias J.L., e Cabrilac R. Influence of the mix parameters and microstructure on the behaviour of concrete at high temperature. Em *Proceedings of 18th international conference on structural mechanics in reactor technology*. 2005.
- Mehta K. e Monteiro P. *Concrete Microstructure, Properties, and Materials.pdf*. Mc Graw Hill, 2006.
- Mindeguia J.C., Pimienta P., Noumowé A., e Kanema M. Temperature, pore pressure and mass variation of concrete subjected to high temperature — Experimental and numerical discussion on spalling risk. *Cement and Concrete Research*, 40(3):477–487, 2010. ISSN 00088846.
- Nguyen V.T. *Comportement des bétons ordinaire et à hautes performances soumis à haute température: application à des éprouvettes de grandes dimensions*. Tesis de Doutorado, Cergy-Pontoise, 2013.
- Pliya B.A.P. *Contribution des fibres de polypropylène et métalliques à l'amélioration du comportement du béton soumis à une température élevée*. Tesis de Doutorado, Cergy-Pontoise, 2010.
- Ranc G., Sercombe J., e Rodrigues S. Comportement à haute température du béton de structure: Impact de la fissuration sur les transferts hydriques. *Revue Française de Génie Civil*, 7(4):397–424, 2003. ISSN 1279-5119. doi:10.1080/12795119.2003.9692502.
- Rostasy F., Weiß R., e Wiedemann G. Changes of pore structure of cement mortars due to temperature. *Cement and Concrete Research*, 10(2):157–164, 1980.
- Sercombe J., Galle C., e Ranc G. Modélisation du comportement du béton à haute température: Transferts des fluides et de chaleur et déformations pendant les transitoires thermiques. *Note Technique SCCME*, 81, 2001.
- Soares T.R., Farage M.C., e Renault N. Análise termo-hídrica do concreto utilizando o CASTEM. *Revista Interdisciplinar de Pesquisa em Engenharia - RIPE*, v.2 n.18:307–324, 2016.
- Thi Thu Huong L. *Étude Multi- Échelle du Comportement Thermo-Hydro-Mécanique des Matériaux Cimentaires*. Tesis de Doutorado, Université Paris-Est, 2011.
- Van Wylen G., Borgnakke C., e Sonntag R. *Fundamentos da termodinâmica*. Série Van Wiley. Edgard Blucher, 2009. ISBN 9788521204909.